中粗 WC 颗粒含量对 Ni-Co 粗晶硬质合金 微观组织及性能的影响

赵晨浩1,徐淑波1,2,李辉3,郑君姿3,卢庆亮4,潘悦飞1

(1. 山东建筑大学 材料科学与工程学院, 山东 济南 250101)

(2. 华中科技大学 材料成形与模具技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430074)

(3. 济南市冶金科学研究所有限责任公司, 山东 济南 250220)

(4. 济南重工集团有限公司,山东 济南 250220)

摘 要:研究了中粗 WC 颗粒含量对 Ni-Co 粗晶硬质合金微观组织与晶粒尺寸分布的影响,进而讨论了晶粒尺寸分布 对硬质合金力学性能的影响。结果显示,中粗 WC 颗粒可均匀分布在粗晶 WC 周围阻碍粗晶与粘结相接触,抑制了粗 晶粒的快速粗化,降低了合金平均晶粒度与平均自由程,使合金的晶粒尺寸分布均匀性逐渐增加;在压力烧结下所有 合金的相对密度均在 99.5%以上;矫顽磁力的测量结果均低于计算值,验证了中粗 WC 颗粒的添加有利于合金晶粒尺寸 分布均匀性的增加;随着中粗 WC 颗粒含量增加,合金平均晶粒度的降低,合金硬度逐渐增加、断裂韧性逐渐降低; 微观组织中超粗晶粒逐渐减少,有利于硬质合金抗弯强度和耐磨性的提高。在 Ni-Co 粗晶硬质合金中加入部分中粗 WC 颗粒有利于减少晶粒粗化进而提高耐磨性,加入 30%中粗 WC 颗粒时综合性能最好。 关键词: Ni-Co 粗晶硬质合金;截线法; WC 邻接度;晶粒尺寸分布;耐磨性

中图法分类号: TG135⁺.5 文献标识码: A 文章编号: 1002-185X(2023)10-3547-09

目前盾构刀具产业正迎来高峰期^[1-3],以钴(Co) 作为硬质合金的粘结金属在盾构刀具上具有广泛的应 用,但我国 Co 资源紧缺且作为战略物资应节省使 用^[4-5]。而 Ni 作为 Co 的同族元素,可一定程度替代 Co 作为粘结金属,我国学者也对 Ni-Co 作为粘结金属 的硬质合金(以下统称为"Ni-Co 硬质合金")进行了大 量研究^[6-11]。研究表明,Ni 本身的硬度和强度低于 Co, 在高温烧结下 Ni 对 WC 的溶解度高于 Co,在硬质合 金中加入 Ni 易使晶粒粗化,导致合金的耐磨性显著降 低^[12]。而盾构刀具在韧性合适时因磨损退役概率占 50%以上^[13],在复杂地质下盾构刀具因磨损退役情况 将迅速增加,因此研究抑制晶粒粗化以提高 Ni-Co 硬 质合金耐磨性具有重要的研究意义。

朱立荣^[14]发现在粗颗粒 WC 中加入细颗粒 WC, 微观组织中超粗晶粒会呈现先增加后减少的趋势,适 量的细颗粒 WC 可缓解晶粒异常长大问题,但作者并 未做耐磨试验的对比。Cao^[15]研究发现在粗颗粒 WC 中加入不同比例细颗粒 WC 可使晶粒度迅速降低,并 逐渐呈现出双峰晶粒尺寸分布,硬质合金耐磨性显著 提高。鲁振运^[16]研究发现将细颗粒 WC 加入粗颗粒 WC 试样中会促进粗晶粒长大,一定程度降低合金的 耐磨性,但继续加入细颗粒 WC 至粘结相溶解度饱和, 粗化晶粒与平均晶粒度会逐渐减小,有利于合金耐磨 性的迅速提高。

综上所述,粗晶硬质合金中加入细颗粒 WC 有益 于晶粒度的降低与耐磨性的提高,但对 Ni-Co 粗晶硬 质合金中因晶粒粗化耐磨性降低的问题需要进一步深 入研究。本实验通过在 Ni-Co 粗晶硬质合金中加入不同 含量中粗 WC 颗粒,分析中粗 WC 含量对微观组织中 晶粒度与晶粒尺寸分布的影响,并进一步分析晶粒度与 晶粒尺寸分布对硬质合金强度与耐磨性的影响规律。

1 实 验

1.1 材料与方法

采用激光粒度分析仪与粉末元素分析仪检测原料 WC 粉末以及 Co、Ni 粉末,相关参数如表 1 所示,合 金 5 组成分配比如表 2 所示。首先按表 2 相关比例混 合特粗与中粗颗粒 WC 粉末,并以 3:7 比例添加 Ni、 Co 粉末作为粘结金属。将 5 组配料分别倒入球磨罐中, 以 23%的无水乙醇作为分散介质,在 GQM-4-5 滚筒式

收稿日期: 2022-10-07

基金项目: 国家自然科学基金 (52001187); 山东省自然科学基金面上项目 (ZR2021ME182)

作者简介:赵晨浩,男,1998年生,硕士生,山东建筑大学材料科学与工程学院,山东 济南 250101, E-mail: zch1785312@163.com

• 3548 •

表 1 制备硬质合金所用粉末相关参数

Table 1	Powder parameters of cemented carbide			
Powder	Particle	Major chemical		
	size/µm	composition, ω /%		
Extra thick	11 12	Total carbon: 6.13±0.05;		
WC	11-13	Free carbon: 0.05; O: 0.03		
Medium	2227	Total carbon: 6.13±0.05;		
coarse WC	2.3-2.1	Free carbon: 0.05; O: 0.07		
Co	1-2	Co≥98.0; Fe: 0.3; C: 0.1; O: 0.5		
Ni	2.5	Ni≥99.8; O: 0.15; Fe: 0.006		

表 2 硬质合金混合配比方案

Table 2Mix proportion design of cemented carbides (%)

Alloy No.	Extra thick WC	Medium coarse WC	Co	Ni
1#	90	0	7	3
2#	80	10	7	3
3#	70	20	7	3
4#	60	30	7	3
5#	50	40	7	3

球磨机中湿磨 16 h,转速为 60 r/min。将湿磨混合料 置于真空干燥箱中烘干,其次将 2%的石蜡溶于汽油后 加入混合粉料中,再次烘干后依次经孔径 380 和 180 µm 的铜网过筛获得混合粉料,最后采用 30T 单柱式液压 机以 15 kN 压力压制合金试样。将所得合金试样置于 德国 PVA 低压烧结炉中于 1430 ℃/5 MPa 氩气下烧结 成型。

1.2 测试与表征

通过 Leica DMI3000M 光学显微镜观察合金的金 相组织,并用截线法^[17-19]在 Image J 软件中统计不少 于 250 个 WC 晶粒的尺寸,绘制晶粒尺寸分布图。利 用排水法测试合金的密度(g/mm³)。利用 YSK-IV 矫 顽磁力仪检测合金的矫顽磁力(kA/m)。利用 WH2002T 型洛氏硬度计测试合金的硬度 HRA。利用 V 形缺口法^[20-21]在 PWS-100/V3.0 电子万能试验机上 测试合金的断裂韧性(MPa·m^{1/2})。利用 WDW-100L 型微机控制电子万能试验机测试合金的抗弯强度 (MPa)。利用 ASTM B611 的磨粒磨损测试标准检测 试样的磨损性能(1/mm³)。测试时需保证氧化铝砂与水 按照 2:1 比例均匀混合,设备机器转速为 60 r/min,测 试时间为 10 min,并采用公式(1)计算合金的耐磨 系数:

$$W = \frac{d}{M} \tag{1}$$

其中, W 为合金的耐磨系数(1/mm³); d 为合金的 实际密度(g/mm³); M 为合金磨损前后的质量损 失(g)。

利用扫描电子显微镜(Phenom PW-100-018)观察 合金断口与磨损面的微观组织,并通过EDS进行试样 的元素分析。

2 结果与讨论

2.1 微观组织

2.1.1 金相组织

图 1a~1e 为添加不同含量中粗 WC 颗粒的硬质 合金的金相组织,图 1f 是 1#~5#合金的平均晶粒度 与邻接度测量结果。从图 1a~1e 中可看出,随着中 粗 WC 颗粒含量增加合金中超粗晶粒逐渐消失,较 细的 WC 晶粒逐渐增加,合金的平均晶粒度逐渐降 低,如图 1f 所示。WC 晶粒生长是遵循"溶解再析 出"的机制^[22-23],再结晶时会优先在未溶解的 WC 晶粒表面生长。随着中粗 WC 颗粒增加粘结相中未 溶解的 WC 晶粒数量增加,单位时间内 WC 晶粒的 长大速度有所减缓,导致合金的平均晶粒度降低。 另外,随中粗 WC 颗粒的增加,经溶解再析出形成 的细晶 WC 会随粘结相移动并均匀分布在粗晶粒 之间,使合金的邻接度逐渐增加,粘结相分布逐渐 趋于均匀。

2.1.2 WC 晶粒尺寸分布

为有效分析添加不同含量中粗 WC 颗粒下硬质合 金的 WC 晶粒尺寸分布规律,通过截线法测量并统计 绘制了晶粒尺寸分布曲线,如图 2 所示。从图中可看 出,所有合金晶粒尺寸分布均呈现偏态分布,中粗 WC 颗粒的增加使晶粒尺寸分布曲线逐渐向左迁移, 表明合金的平均晶粒度呈降低趋势,且合金的晶粒尺 寸分布均匀性逐渐增加。

从图 2 中插图可知,大于 10 μm 的超粗晶占比 随中粗 WC 颗粒的增加逐渐减少,加入 10%中粗 WC 颗粒时合金中超粗晶含量减少最为显著。一方 面,中粗 WC 晶粒含量增加使单位体积内形核数目 增加,而 2 种 WC 晶粒尺寸相差较小,WC 晶粒之 间生长驱动力较小,2 种晶粒可同时长大并迅速转 变为平衡状态;另一方面是溶解再析出的细晶 WC 易包覆在粗晶粒上,阻碍了粗晶粒与粘结相之间的 接触,再结晶时细晶 WC 更容易长大为中粗 WC 晶 粒,一定程度抑制了粗晶粒的快速长大,最终合金 中超粗晶比例逐渐降低。因此在 Ni-Co 粗晶硬质合 金中添加适量的中粗 WC 颗粒有利于缓解 Ni-Co 粘 结相中 WC 晶粒粗化的现象。



图 1 中粗 WC 颗粒含量对 Ni-Co 粗晶硬质合金微观组织的影响

Fig.1 OM microstructures (a-e) and average grain size and adjacency (f) of five Ni-Co cemented carbides with different medium coarse WC particles contents



- 图 2 不同中粗 WC 颗粒含量的 Ni-Co 粗晶硬质合金 WC 颗粒 尺寸分布曲线
- Fig.2 WC grain size distribution curves of five Ni-Co cemented carbides with different medium coarse WC particles contents

2.2 力学性能

2.2.1 密度

利用阿基米德排水法测定的硬质合金的密度如图 3 所示,合金密度随中粗 WC 颗粒的增加逐渐增加。 硬质合金的致密化指液相烧结中的颗粒重排与溶解再 结晶过程,而在粗晶硬质合金中 WC 晶粒溶解与再结 晶数量较少,主要依靠液相的毛细管力推动 WC 颗粒 的重新排布提高致密化。中粗 WC 颗粒的加入提升了



图 3 中粗 WC 颗粒含量对 Ni-Co 粗晶硬质合金密度的影响

Fig.3 Effect of medium coarse WC content on Ni-Co cemented carbides density

WC 调整与重排的推动力,可充分填充粗晶粒之间的 孔隙,促进了合金致密度的进一步提高。由于合金试 样在低压烧结炉中烧结,其相对密度均在 99.5%以上, 符合使用标准。

2.2.2 矫顽磁力

如图 4 所示, 矫顽磁力随中粗 WC 颗粒的增加呈 上升趋势。晶粒度 *d*_{WC} 与矫顽磁力 *H*_c 关系式^[24]如式 (2) 所示:



图 4 Ni-Co 粗晶硬质合金的矫顽磁力与晶粒尺寸之间的关系

Fig.4 Relationship between coercivity and grain size for Ni-Co cemented carbides with different medium coarse WC particles contents

$$H_{\rm c} = \frac{52.8}{\rm Com^{0.58} \cdot d_{\rm WC}^{0.77}} \tag{2}$$

式中, Com 为磁饱和(%), 仪器测得 1#~5#合金的 Com 约为 8%。

由式(2)可知,粘结相中 Co 含量不变时,磁饱 和基本不变,晶粒度的大小是影响矫顽磁力的主要因 素。由微观组织分析可知,1#~5#合金的 WC 晶粒尺 寸逐渐减小,Co 相分散度逐渐增加,因此硬质合金的 矫顽磁力逐渐增加。将试样矫顽磁力测量值与式(2) 拟合结果进行比较,如图 4 所示,可观察到合金的矫 顽磁力均在拟合曲线之下。这是因为晶粒尺寸分布对 磁力也具有显著的影响^[25-26],晶粒度均匀分布时硬质 合金的矫顽磁力较低。与随着中粗 WC 颗粒的添加硬 质合金晶粒尺寸分布均匀性逐渐增加的现象一致。 2.2.3 硬度

由图 5 可知,合金的硬度随中粗 WC 颗粒含量的 增加呈线性上升趋势。已有研究^[27-28]通过实验数据拟合 出硬质合金硬度与平均晶粒度之间有如式(3)的关系:

$$H_{\rm v} = 550 + \frac{23500}{\sqrt{d_{\rm wc}}}$$
(3)

根据式(3)可知,粘结相含量一定时,硬质合金的硬度主要与 WC 晶粒的尺寸有关,并随 WC 晶粒度的降低逐渐增加。1#~5#硬质合金的平均晶粒度逐渐降低,合金的硬度逐渐增加。研究发现,硬质合金的硬度与致密度存在一定的相关性。由图 3 可知,适量的中粗 WC 颗粒可降低孔隙的体积分数、提高合金的致密度,WC 晶粒骨架强度的提高进一步提高了合金的硬度。因此,随中粗 WC 颗粒的增加硬质合金的硬度 逐渐上升。



图 5 中粗 WC 颗粒含量对 Ni-Co 粗晶硬质合金硬度的影响

Fig.5 Effect of medium coarse WC particles content on Ni-Co cemented carbides hardness

2.2.4 断裂韧性

通过 V 形缺口法来测试合金的断裂韧性, V 形缺口的尺寸与角度如图 6 所示,由电子万能试验机测试出合金断裂时的最大临界压力 *P*_{max},并将其代入式(4)计算合金的断裂韧性。

$$K_{\rm IC} = \frac{P_{\rm max}}{B\sqrt{W}} Y_{\rm C} \tag{4}$$

式中: K_{IC} 为断裂韧性, MPa·m^{1/2}; P_{max} 为合金断裂时 受到的最大临界压力, N; B为合金试样的宽, mm; W为合金试样的高, mm; Y_C 为尺寸系数, 取 15.94。

由图 7a 可看出,断裂韧性随中粗 WC 颗粒的增加 逐渐降低。断裂韧性主要体现了裂纹扩展的难易程度, 而平均晶粒度与平均自由程是影响断裂韧性的主要因 素^[29],平均晶粒度与平均自由程的降低导致 WC 晶粒 与粘结相之间的结合强度降低,硬质合金的断裂韧性 迅速降低。为准确分析试样断裂韧性的变化趋势,绘



L=40 mm; *W*=7.4 mm; *B*=4.8 mm; θ =60°; a_0 =2.74 mm; a_1 =6.89 mm

图 6 V 形切口法测试硬质合金的断裂韧性时切口尺寸

Fig.6 Notching size for fracture toughness measurement of cemented carbide by mountain notching method



图 7 不同中粗 WC 颗粒含量的 Ni-Co 粗晶硬质合金断裂韧性 和其测试过程中的力-变形量曲线

Fig.7 Fracture toughness of five Ni-Co cemented carbides with different medium coarse WC particles contents (a) and typical curves of force versus deflection during alloy fracture toughness testing (b)

制了力-变形量曲线,如图 7b 所示。从断裂曲线得知, 试样达到临界裂纹长度时,扩展裂纹所需载荷达到最 大值 P_{max}。由公式(4)可知,断裂韧性与断裂载荷 P_{max} 呈正相关,随中粗 WC 颗粒的加入断裂载荷 P_{max}逐渐 降低,因此试样断裂韧性逐渐降低。但中粗 WC 颗粒 的加入一定程度增加了裂纹的扩展路径,4#合金相对 于其他试样的裂纹扩展长度提升最大可达 24.1%,试 样裂纹扩展所需能量有所增加。故硬质合金断裂韧性 均匀降低,无断崖式下降现象。

2.2.5 抗弯强度

图 8 是添加不同含量中粗 WC 颗粒硬质合金的抗 弯强度。从图中可看出,硬质合金的抗弯强度随中粗 WC 颗粒含量的增加呈上升趋势,但 4#与 5#合金的抗 弯强度相差不大。抗弯强度表示硬质合金的综合性能, 主要与 WC 晶粒度、Co 粘结相含量、组织结构及孔隙 等因素有关。经研究显示,各种粘结相的硬质合金均 存在抗弯强度随晶粒度降低而上升的阶段^[30-31]。这主 要与超粗晶粒消失有关,较细的 WC 晶粒更容易分散



图 8 不同中粗 WC 颗粒含量的 Ni-Co 粗晶硬质合金的抗弯 强度

Fig.8 Bending strength of five Ni-Co cemented carbides with different medium coarse WC particles contents

应力,而超粗晶粒在承压时难以分散应力易形成断裂 源,添加部分中粗 WC 颗粒抑制了超粗晶粒的出现, 有利于抗弯强度的提高。同时致密度的提高也减少了 缺陷的出现,提高了合金的抗弯强度。

为详细分析硬质合金的弯曲断裂机制,对5组合 金的断口取样,微观形貌如图9所示。在所有合金中 均未观察到孔隙,原因是合金的相对密度较高,孔隙 缺陷出现几率较小。从图中可看出,随着中粗WC颗 粒的添加硬质合金中穿晶断裂(A)数量逐渐减少,沿晶 断裂(B)数量逐渐增加。因此,超粗晶作为断裂源导致 1#合金的抗弯强度最低,随着断裂源的减少硬质合金 抗弯强度逐渐上升。但硬质合金的断裂取决于断裂源 开裂与裂纹扩展两者共同作用,加入中粗WC颗粒后 晶粒团聚增大,WC 晶粒邻接度逐渐增加导致裂纹扩 展更容易,抗弯强度增加趋势逐渐减缓。因此4#与5# 合金的抗弯强度差距较小。

2.2.6 耐磨性

图 10 为添加不同含量中粗 WC 颗粒硬质合金试 样的耐磨系数。可明显看出,合金的耐磨性与硬度呈 正相关趋势,随中粗 WC 颗粒的增加逐渐增加。粗晶 硬质合金随 WC 晶粒度的减小耐磨性逐渐增加,WC 晶粒在受压时破碎程度较小,有利于合金耐磨性的提 高。硬质合金的耐磨性与密度、平均自由程也有一定 的关系,致密度的提高有利于组织中 WC 晶粒强度提 高,磨损时平均自由程较高可保证合金表面的润滑性。 因 1#~5#合金的平均自由程与致密度相差不大,故两 者的作用在图 10 中难以体现。

图 11 显示了 5 种中粗 WC 颗粒含量的粗晶硬质合 金磨损面的微观形貌。硬质合金的磨损方式主要包括



图 9 不同中粗 WC 颗粒含量的 Ni-Co 粗晶硬质合金弯曲断口 SEM 形貌

Fig.9 Bending fracture SEM morphologies of five Ni-Co cemented carbides with different medium coarse WC particles contents (the A zone is transcrystalline fracture, the B zone is intercrystalline fracture)

WC 晶粒的破碎与剥落^[32],从图 11 中可看出,粗晶硬 质合金中未观察到 WC 晶粒的剥落,合金磨损程度主 要体现于 WC 晶粒的破碎程度。图 11a 和 11b 显示 1#和 2#合金表面 WC 晶粒碎裂严重,裸露出大量的 黑色粘结相区域。这是因为 1#合金中存在大量的超 粗 WC 晶粒,这些超粗晶粒在粘结相磨损前即可发生 开裂与破碎现象,破碎后的晶粒会作为微磨粒加速合 金表面的磨损,合金表面劣化严重。而在图 11c~11e 中仍可看到完整的 WC 晶粒,一方面是合金中超粗晶 破碎产生的微磨粒数量减少,表面劣化程度逐渐减 弱;另一方面,中粗 WC 晶粒受压时较难破碎。3#~5# 合金磨损后在组织中可保持完整 WC 晶粒,合金表面 的骨架强度提高,因此加入适量的中粗 WC 颗粒可提 高硬质合金耐磨性。

从图 11 插图的 EDS 能谱中可得知, WC 晶粒 破碎后裸露的黑色粘结相会被氧化腐蚀, 合金平均 自由程越高磨损后残留的氧元素越多, 磨损实验中 粘结相氧化或腐蚀后会加速硬质合金的磨损。因 此,硬质合金中平均自由程合适时最有助于耐磨性 的提高。



图 10 不同中粗 WC 颗粒含量的 Ni-Co 粗晶硬质合金的耐磨系数 Fig.10 Abrasion resistance factor of five Ni-Co cemented carbides with different medium coarse WC particles contents



图 11 不同中粗 WC 颗粒含量的 Ni-Co 粗晶硬质合金磨损面的 SEM 形貌和 EDS 能谱分析结果

Fig.11 SEM morphologies of the wear surface and EDS analysis results of five Ni-Co cemented carbides with different medium coarse WC particles contents: (a) 1#, (b) 2#, (c) 3#, (d) 4#, and (e) 5#

3 结 论

1) 在 Ni-Co 粗晶硬质合金中添加部分中粗 WC 颗粒可一定程度减少晶粒粗化的现象,提高合金晶粒尺寸分布的均匀性,平均晶粒度的降低使邻接度逐渐升高,粘结相分布更加均匀。

2) Ni-Co 粗晶硬质合金密度与矫顽磁力随中 粗 WC 颗粒的增加逐渐增加;硬度随晶粒度的降 低呈现上升趋势;断裂韧性随晶粒度的降低呈现 下降趋势。

3) 添加中粗 WC 颗粒减少了超粗晶作为断裂源的 概率, 抗弯强度呈上升趋势, 微观组织中 WC 邻接度 增加降低了裂纹扩展难度,在两者综合作用下合金抗 弯强度先上升后趋于稳定。

4) 添加中粗 WC 颗粒减少了超粗晶破碎后作为微磨粒对合金表面的磨擦磨损,中粗 WC 晶粒的增加提高了晶粒的骨架强度,平均自由程的降低减少了氧化磨损的概率。通过加入部分中粗 WC 颗粒一定程度解决了 Ni-Co 粗晶硬质合金耐磨性降低的问题。

参考文献 References

[1] Zhang Zhongjian(张忠健), Zhang Lu(张 璐), He Jun(贺 军)

et al. Cemented Carbides(硬质合金)[J], 2015, 32(5): 340

- [2] Editorial Board of China Journal of Highway and Transport(《中国公路学报》编辑部). China Journal of Highway and Transport(中国公路学报)[J], 2022, 35(4): 1
- [3] Wei Y J, Zheng X, Su F et al. Journal of Testing and Evaluation[J], 2019, 47(2): 927
- [4] Yang Zi(杨 梓). China Energy News(中国能源报)[N]. 2022-05-30(009)
- [5] Zhao Junxing(赵俊兴), Li Guangming(李光明), Qin Kezhang (秦克章) et al. Science Bulletin(科学通报)[J], 2019, 64(24): 2484
- [6] Luo Cheng(罗成), Liang Xiaodong(梁小东), Tang Dongmei (唐冬梅) et al. Cemented Carbides(硬质合金)[J], 2022, 39(3): 195
- [7] Zhang Fan(张 帆), Zhang Jinxiang(张金祥), Wen Xiaoqiang (文小强) et al. Rare Metal Materials and Engineering(稀有金 属材料与工程)[J], 2020, 49(11): 3950
- [8] Yang Bihua(杨碧华), Zhou Jianhua(周建华), Li Jinyao(李晋 尧). Rare Metal Materials and Engineering(稀有金属材料与 工程)[J], 1996, 25(6): 36
- [9] Eun K Y, Kim D Y, Yoon D N. Powder Metallurgy[J], 1984, 27(2): 112
- [10] Su W, Sun Y X, Liu J et al. Ceramics International[J], 2015, 41(2): 3169
- [11] Li Min(李 敏), Gan Xufa(甘绪发), Zhang Honggang(张洪 刚). Rare Metals and Cemented Carbides(稀有金属与硬质 合金)[J], 2022, 50(3): 87
- [12] Zhao Yuling(赵玉玲), Zhang Hao(张 颢), Zou Deliang(邹德良) et al. Cemented Carbides(硬质合金)[J], 2021, 38(4): 236
- [13] Qin Qin(秦琴), Wang Nan(王楠), Yan Ziyi(颜子镒) et al.
 Rare Metals and Cemented Carbides(稀有金属与硬质合金)[J], 2021, 49(5): 82
- [14] Zhu Lirong(朱立荣), Long Jianzhan(龙坚战), Xie Hao(谢浩) et al. Cemented Carbides(硬质合金)[J], 2018, 35(4): 265
- [15] Cao R J, Lin C G, Xie X C et al. Rare Metals[J], 2018, 42(2):2809
- [16] Lu Zhenyun(鲁振运). Research on Preparation of Regenerated Coarse Grained Cemented Carbide and Wear and Corrosion Resistance(再生粗晶硬质合金的制备与耐磨耐蚀性能研 究)[D]. Jinan: Qilu University of Technology, 2021
- [17] Jian Yumei(菅豫梅), Tian Lei(田 雷), Chen Chuanlan(陈川 兰). Hunan Nonferrous Metals(湖南有色金属)[J], 2021, 37(6): 75

- [18] Zhu Jifei(朱骥飞), Zhang Li(张立), Xu Tao(徐涛) et al. Materials Science and Engineering of Powder Metallurgy(粉 末冶金材料科学与工程)[J], 2015, 20(1): 26
- [19] Engqvist H, Uhrenius B. International Journal of Refractory Metals & Hard Materials[J], 2003, 21(1-2): 31
- [20] Pickens J R, Gurland J. Materials Science and Engineering[J], 1978, 33(1): 135
- [21] Sheikh S, M'Saoubi R, Flasar P et al. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials[J], 2015, 49: 153
- [22] Wang X N, Zhou D R, Xu P Q. Ceramics International[J], 2019, 45(17): 23 320
- [23] Müller D, Konyashin I, Farag S et al. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials[J], 2022, 102: 105 714
- [24] Li Yong(李 勇), Long Jianzhan(龙坚战). Cemented Carbides (硬质合金)[J], 2010, 27(4): 195
- [25] Liu Huaping(刘华平), Lu Qingzhong(陆庆忠), Mao Yongfa (毛咏发). Proceedings of the Eleventh China Cemented Carbide Academic Conference(第十一次中国硬质合金学术 会议论文集)[C]. Yinchuan: Cemented Carbide Branch of China Tungsten Association, 2014: 152
- [25] Gu Jinbao(顾金宝), Diao Chunmin(刁椿珉), Shi Kaihua(时 凯华) et al. Cemented Carbides(硬质合金)[J], 2021, 38(3):
 193
- [26] Huang Peiyun(黄培云). Powder Metallurgy Principle(粉末 冶金原理)[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1997: 417
- [27] Cha S I, Hong S H. International Journal of Materials Research[J], 2005, 96(2): 172
- [28] Wu Chonghu(吴冲浒), Nie Hongbo(聂洪波), Zeng Qisen(曾 祺森) et al. Materials Science and Engineering of Powder Metallurgy(粉末冶金材料科学与工程)[J], 2013, 18(2): 198
- [29] Mao Shanwen(毛善文). Cemented Carbides(硬质合金)[J], 2013, 30(4): 197
- [30] Tan Yongsheng(谭永生), Cai Heping(蔡和平), Ma Baodian (马宝钿) et al. Rare Metal Materials and Engineering(稀有 金属材料与工程)[J], 1996, 25(6): 7
- [31] Sun Y X, Su W, Yang H L et al. Ceramics International[J], 2015, 41(10): 14 482
- [32] Wang H B, Gee M, Qiu Q F et al. Journal of Materials Science & Technology[J], 2019, 35(11): 2435

Effect of Medium Coarse WC Particles Content on the Microstructure and Properties of Ni-Co Coarse Grain Cemented Carbide

Zhao Chenhao¹, Xu Shubo^{1,2}, Li Hui³, Zheng Junzi³, Lu Qingliang⁴, Pan Yuefei¹

(1. School of Materials Science and Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, China)

(2. Die & Mould Technology National Key Laboratory, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

(3. Jinan Metallurgical Science Research Institute Co., Ltd, Jinan 250220, China)

(4. Jinan Heavy Industries Group Co., Ltd, Jinan 250220, China)

Abstract: The effect of medium coarse WC particles content on the microstructure and grain size distribution of Ni-Co coarse grain cemented carbide was studied, and then the effect of grain size distribution on the mechanical properties of cemented carbide was discussed. The results show that the medium coarse WC grains can be uniformly distributed around the coarse WC grains to hinder the contact between the coarse grains and the bonding phase, which inhibits the rapid coarsening of the coarse grains, reduces the average grain size and average free range of the alloy, and gradually transforms the grain size distribution into a bimodal distribution; the relative densities of all the alloys under pressure sintering are above 99.5%, and the bimodal distribution of the grains size in the microstructure is verified by the phenomenon that the alloys measured coercivities are lower than the calculated. With the increasing in medium coarse WC content, the alloy average grain size decreases, the hardness gradually increases and the fracture toughness decreases; the decrease of super coarse grains content in the microstructure is beneficial to the improvement of flexural strength and wear resistance of the carbide. The appropriate addition of medium coarse WC particles to the Ni-Co coarse grain cemented carbide is beneficial to reduce the grain coarsening and thus improve the wear resistance, and the best comprehensive performance is achieved with 30% medium coarse WC particles.

Key words: Ni-Co coarse-grained cemented carbide; truncation method; WC grain adjacency; grain size distribution; abrasion resistance

Corresponding author: Xu Shubo, Ph. D., Professor, School of Materials Science and Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, P. R. China, E-mail: xsb@sdjzu.edu.cn